

基于目标轮廓自动校正的激光反射层析成像投影配准方法

张鑫源^{1,2,3}, 胡以华^{1,2,3*}, 韩飞^{1,2,3}, 石亮^{1,2,3}, 徐世龙^{1,2,3}, 陈友龙^{1,2,3},
王一程^{1,2,3*}

1. 国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;
2. 国防科技大学 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;
3. 国防科技大学 电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 激光反射层析成像(Laser Reflective Tomography Imaging, LRTI)技术具有分辨率与距离无关的特点,在空间目标遥感中具有广阔的应用前景。在目标图像重构之前,多角度回波投影数据需要与目标旋转中心对齐,这就是投影配准技术。本文提出了一种基于目标轮廓自动校正的投影配准方法,实验结果表明,该方法易于实现对简单目标旋转中心的自配准,能有效减少激光脉冲发射和探测器接收的随机抖动等造成的干扰,解决了图像模糊的问题,是一种LRTI多角度回波配准的新思路。

关键词: 激光雷达; 反射层析; 投影配准; 轮廓自动校正

中图分类号: O439

文献标识码: A

Laser reflective tomography imaging projection registration method based on target contour auto-correction

ZHANG Xin-Yuan^{1,2,3}, HU Yi-Hua^{1,2,3*}, HAN Fei^{1,2,3}, SHI Liang^{1,2,3}, XU Shi-Long^{1,2,3},
CHEN You-Long^{1,2,3}, WANG Yi-Cheng^{1,2,3*}

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
3. Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: Laser reflective tomography imaging has a wide application prospect of space target remote sensing because its resolution is independent of distance. Before the reconstruction of the target image, the multi-angle echoes projection data need to be aligned with the rotation center of the target, which is the projection registration technique. This paper proposed a projection registration method based on the target contour auto-correction, and the experimental results show that the method is easy to implement on simple target since the registration center of rotation, can effectively reduce the number of laser pulses launch and detector receive random jitter caused by the interference, such as solved the problem of the fuzzy image, is a kind of LRTI multi-angle echoes registration of new ideas.

Key words: lidar, reflective tomography, projection registration, contour auto-correction

收稿日期: 2022-10-27, 修回日期: 2023-02-13

Received date: 2022-10-27, Revised date: 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(61871389, 62205372); 国防科技大学校科研项目重大应用基础研究项目(ZK18-01-02); 国防科技创新特区项目(22-TQ23-07-ZD-01-001); 湖南省研究生科研创新项目(CX20220007)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61871389, 62205372); Research Plan Project of the National University of Defense Technology (ZK18-01-02); National Defense Science and Technology Innovation Special Zone project (22-TQ23-07-ZD-01-001); Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (CX20220007)

作者简介(Biography): 张鑫源(1997—), 男, 河南博爱人, 博士研究生, 主要研究领域为反射层析激光雷达成像. E-mail: skl_zxy@163.com

* 通讯作者(Corresponding authors): E-mail: skl_hyh@163.com, skl_wyc@163.com

引言

激光反射层析成像(Laser Reflective Tomography Imaging, LRTI)技术是在计算机断层(Computed Tomography, CT)成像技术基础上发展起来的一种新型、远距离、高分辨成像技术。传统的光学遥感成像系统由于受到光学衍射极限的限制,其分辨率不足,难以观测远距离空间目标的精细结构。而基于LRTI的激光雷达系统能够克服分辨率的限制,具有成像分辨率与探测距离无关的特点,易于实现远距离空间目标的高分辨成像^[1]。

LRTI技术最早由美国林肯实验室的Parker等人于1988年提出,他们采用滤波反投影(Filtered Back Projection, FBP)算法重建得到10 m处圆锥目标的截面图像,成像分辨率为12.6 cm^[2]。1989年, Knight等人对实验系统进行了改进,用EG&G条纹相机取代了光电倍增管,将成像分辨率提高到4 cm^[3]。Matson等人进一步对LRTI理论和应用进行了研究^[4-6],于2001年对轨道高度915 km的LACE卫星体和望远镜臂上的两个锱角反射镜实现了图像重建,成像分辨率约为0.2 m^[7]。2010年, Murray等进行了基于脉冲压缩的距离分辨LRTI试验,在22.4 km处实现了相距1 m、尺度为30 cm的三个均匀旋转角度反射镜的图像重建,成像分辨率为15 cm^[8]。胡以华课题组于2021年11月在国内首先开展了公里级LRTI实验^[9],在0.98 km处实现了由三个夹角为135°、边长5 cm的正方形组成的组合平面目标的图像重建,成像分辨率约为2 cm^[10]。

不同于CT成像只需要采集180°的数据, LRTI需要采集目标360°的回波数据,然后将共线的两组回波数据依据旋转中心配准后叠加到一起,形成180°的投影数据,这就是投影配准技术。常见的投影配准方法主要包括参考屏法、特征点跟踪法和分光法。参考屏法是地面验证实验中最常见的投影配准方法,它要求参考屏相对于激光波束始终静止,然后依据其到旋转中心距离不变的特点对多角度回波波形进行配准。然而,在实际目标附近很难有理想的参考屏。因此,该方法并不能适应实际目标探测的需求。特征点跟踪法是基于目标表面反射系数突然变化的点实现的^[11],但目标表面往往缺乏这样的特征点,且为了区分特征点,其要求的极窄激光脉冲宽度不符合系统设计实际。分光法是将激光束在分束器中分成两路,一路覆盖目标,另一路照入探测器作为参考光。这种方法具有较高

精度,但由于远距离探测中波形接收的时间延迟较大,对探测电路的采集时间要求更高^[12]。

陈剑彪等依据同一目标的相邻投影具有很强的相关性的特性,提出了一种以总投影的平均包络线达到最大值的对比作为对齐准则的投影配准算法,并针对立方体目标开展了仿真和实验,验证了该算法的可行性^[13]。然而,这种方法在不依靠参考屏的情况下,仅能对目标的旋转中心位置进行粗略的估计,忽略了LRTI系统在实际工作过程中,由于目标或探测器的抖动、激光脉冲发射和探测器接收的随机抖动以及大气湍流等因素的干扰,会在时间维度上出现信号漂移,进而导致重构图像模糊,影响重构图像的准确性。对于某些剖面形状较为简单的体目标,如立方体、三棱柱等,由于其重构图像的轮廓为闭合图形,可以尝试利用重建目标的轮廓进行自配准。本文研究了多角度投影数据需要相对于目标旋转中心对齐的问题,提出了一种基于目标轮廓自动校正的投影配准方法。实验结果表明,该方法易于实现对简单目标旋转中心的自配准,能有效减少激光脉冲发射和探测器接收的随机抖动等造成的干扰,解决了图像模糊的问题,是一种特殊形状目标的快速配准方法,是一种LRTI多角度回波配准的新思路。

1 CT成像与LRTI原理概述

1.1 CT成像原理概述

CT成像是探测X射线透射后的射线强度,然后利用衰减信息进行重建来获得物体的断层图像的技术^[14]。CT成像的基础理论拉冬(Radon)变换,其内涵为求解目标内部的 $\alpha(l)$ 沿某直线方向上的线积分,即目标在该方向上的投影。

首先描述投影获取过程,如图1所示,蓝线内区域是待成像物体,其内部的衰减系数二维分布表示为 $f(x, y)$,一束X射线穿透物体到达探测器,强度变化为:

$$I = I_0 \exp \left[- \int_L f(x, y) dl \right] \quad , \quad (1)$$

式中 I_0 是发射光强, I 是接收光强,物体在路径 L 上的投影定义为衰减系数沿射线方向的线积分:

$$p = \int_L f(x, y) dl \quad , \quad (2)$$

图1中点 (x, y) 在极坐标系下转化为 (r, θ) , X射线在极坐标下表示为 $s = x \cos \theta + y \sin \theta$,其中 r 是点 (x, y) 到坐标原点的距离, θ 是点 (x, y) 到坐标原点的

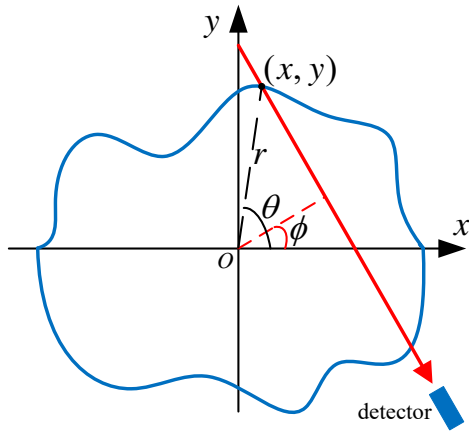


图1 CT成像投影获取过程示意图

Fig. 1 The schematic diagram of CT imaging projection acquisition process

直线与 x 轴的夹角, ϕ 是射线的法线与 x 轴的夹角, s 是坐标原点到 X 射线的距离。由 Radon 变换给出:

$$\begin{aligned} p(s, \phi) &= \int_L f(x, y) dl = \int_L f(r, \theta) dl \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f\left(\sqrt{s^2 + l^2}, \phi + \arctan \frac{l}{r}\right) dl \end{aligned} \quad (3)$$

式中 l 是目标在透射方向的厚度, Radon 逆变换给出:

$$f(r, \theta) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{r \cos(\theta - \phi) - l} \frac{\partial p}{\partial l} dl d\phi, \quad (4)$$

直接反投影是将投影按角度均匀涂抹的过程, 数学表示为:

$$g(x, y) = \int_0^\pi p(s, \phi) |_{s=x \cos \theta + y \sin \theta} d\phi \quad (5)$$

式(5)中 $g(x, y)$ 是重建得到的物体的断层图像, 实际应用中多使用离散形式。而直接反投影存在复原模糊的问题, 根据傅里叶切片定理: 原数据投影的一维傅里叶变换等于原数据的二维傅里叶变换。利用傅里叶切片定理进行初步滤波处理, 即为 FBP 算法。根据傅里叶切片定理:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega, \theta) \exp(i2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)) \omega d\omega d\theta \end{aligned} \quad (6)$$

式中 ω 是与 s 对应的频率分量, $G(\omega, \theta)$ 是投影 $g(s, \theta)$ 的一维傅里叶变换, 由于透射方向没有正反, 即 $G(\omega, \theta + \pi) = G(-\omega, \theta)$, 上式化简为:

$$f(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega, \theta) \exp(i2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)) |\omega| d\omega d\theta \quad (7)$$

式中内侧积分是一个一维傅里叶变换形式, $|\omega|$ 是由直角坐标系转到极坐标系产生的雅可比因子, 起到了斜坡滤波器的作用。考虑到理想斜坡滤波器无法实用的问题, 通常用一些改进的滤波器替代。

1.2 LRTI原理概述

与 CT 成像相同, LRTI 的基本重建算法是 FBP 算法, 其数学原理是傅立叶中心切片定理。如图 2 所示, 平行激光光束照射并覆盖二维目标, 照射角度为 ϕ , 目标在该角度下的投影定义为:

$$p(s, \phi) = \int_{L_{r, \phi}} f(x, y) ds \quad (8)$$

式中 $L_{r, \phi}$ 是积分路径, 垂直于光照方向的直线 $s = x \cos \phi + y \sin \phi$, $f(x, y)$ 是目标的反射率系数分布。

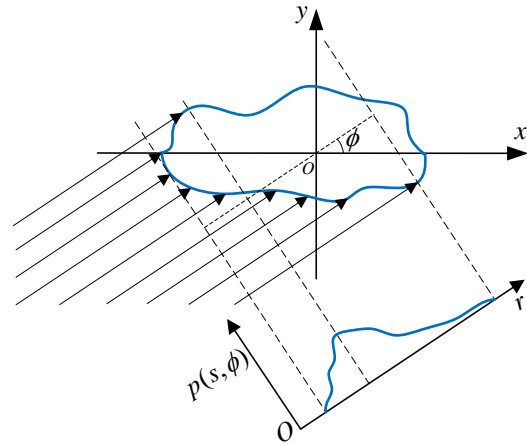


图2 LRTI原理图

Fig. 2 The schematic diagram of LRTI

图2绘制了角度 ϕ 的投影 $p(s, \phi)$ 的示意图, 图中蓝线是目标表面轮廓线, 箭头覆盖区域即为激光照射区域, 投影的距离范围取决于被激光照射目标区域的深度信息范围。

值得注意的是, LRTI 中激光无法穿透目标, 仅能接收到经目标表面调制后的回波波形, 所以实际上目标的反射率系数仅在表面不为零, 即:

$$f(x, y) = 0, \quad (x, y) \notin B \quad (9)$$

式中 B 是目标表面点集, 此时投影可以表示为:

$$p(s, \phi) = \int_{L_{r, \phi} \cap B} f(x, y) ds \quad (10)$$

把各个角度的投影 $p(s, \phi)$ 按照角度 ϕ 反涂抹并叠加称为直接反投影, 通常使用 FBP 算法去除伪影, 重建得到目标横截面图像表示为:

$$g_{FB}(x, y) = \sum_{i=1}^n F_1^{-1} [|\omega| F_1 [p(s, \phi)]] \quad (11)$$

式中, n 是投影数量, F_1, F_1^{-1} 分别代表一维傅里叶变

换和逆变换算符, $|\omega|$ 是由直角坐标系转到极坐标系产生的雅可比因子, 实际上起到了斜坡滤波器的作用。本文实际应用的是 Ram-Lak 滤波函数, 是为了解决理想斜坡滤波器无法实用的问题, 设置了截止频率, 实现频域加窗, 是目前 LRTI 最常用的滤波器。

2 投影配准方法

2.1 投影配准原理

CT 成像是探测 X 射线透射后的射线强度, 其投影具有方向可逆性, 即

$$p(s, \phi + \pi) = p(2d - s, \phi) \quad (12)$$

式中 d 是旋转中心的距离, 这说明 CT 成像的共线投影相同, 只需要采集 180 度的投影数据即可成像。然而 LRTI 不满足可逆性, 因此需要采集 360 度的回波数据, 然后将共线的两组回波数据叠加到一起。

如图 3 所示, 叠加后形成的投影数据可以表示为:

$$p^*(s, \phi) = p(s, \phi) + p(2d - s, \phi + \pi) \quad (13)$$

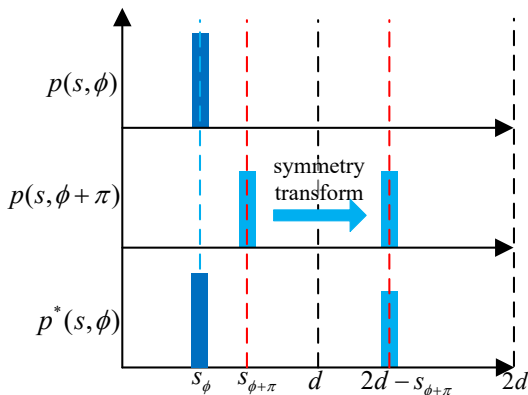


图3 LRTI共线投影叠加示意图

Fig. 3 The schematic diagram of LRTI

图示坐标 d 处为旋转中心, 浅蓝色表示的 $p(s, \phi + \pi)$ 作对称变换得到 $p(2d - s, \phi + \pi)$, 然后与深蓝色表示的 $p(s, \phi)$ 叠加得到叠加后形成的投影数据 $p^*(s, \phi)$, 在 $\phi \in (0, \pi)$ 区间求得 180 度的投影数据, 然后使用 FBP 算法得到重构图像。

根据图 3 易得, 旋转中心距离 d 的误差将引起各个角度的投影 $p(s, \phi)$ 的误差, 根据式(11)可得, 这将直接影响重构图像中目标轮廓的准确性。而旋转中心距离 d 确定后, 由于目标或探测器的抖动、激光脉冲发射和探测器接收的随机抖动以及大气湍流等因素的干扰, $p(s, \phi)$ 和 $p(s, \phi + \pi)$ 会在时间维度上出现漂移。也就是说, $p(s, \phi)$ 和 $p(s, \phi + \pi)$

相对旋转中心的距离会在真实距离附近产生波动, 那么 $p(s, \phi)$ 和作对称变换前的 $p(s, \phi + \pi)$ 相对旋转中心的距离都需要校准, 进而解决重构图像模糊、重构图像准确性不足的问题。

2.2 FBP 重构与直线段检测

旋转中心距离 d 确定后, 就可以将 $p(s, \phi)$ 与 $p(2d - s, \phi + \pi)$ 叠加得到叠加后形成的投影数据 $p^*(s, \phi)$, 然后利用 FBP 算法实现目标图像重构, 其流程如表 1 所示。

表1 FBP 重构流程

Table 1 FBP reconstruction process

步骤1 将叠加后形成的各个角度的投影数据 $p^*(s, \phi)$ 做快速傅里叶变换。

步骤2 在傅里叶变换上乘上 Ram-Lak 滤波函数 $H_{R-L}(\omega) =$

$$|\omega| \text{rect}(\omega/2B), \text{式中 } \text{rect}(\omega/2B) = \begin{cases} 1, & |\omega| < B \\ 0, & |\omega| \geq B \end{cases}$$

步骤3 对各个角度处理后的数据进行快速傅里叶逆变换。

步骤4 对各个角度逆变换后的数据进行角度重排, 并按最邻插值法进行像素点定值, 得到单角度反投影图。

步骤5 将所有角度的反投影图叠加, 得到目标重建图像 G_0 。

FBP 算法重构得到目标图像 G_0 后, 考虑到剖面形状较为简单的体目标, 其重构图像是由局部的直的轮廓组成的, 因此检测图像中局部的直的轮廓。直线段检测 (Line Segment Detector, LSD) 法是一种能在线性时间内得到亚像素级准确度的直线段检测算法, 且在任何数字图像上使用都无需进行参数调节^[15]。该算法的具体流程是, 首先计算图像中所有点的梯度大小和方向, 然后将梯度方向变化小且相邻的点作为一个连通域, 接着根据每一个域的矩形度判断是否需要按照规则将其断开以形成多个矩形度较大的域, 最后对生成的所有的域做改善和筛选, 保留其中满足条件的域, 即为最后的直线段检测结果。采用 LSD 法对原始重构图像 G_0 进行检测, 得到直线段初始估计 L_1, L_2, \dots, L_n 。

2.3 目标轮廓估计与回波数据校正

根据直线段初始估计 L_1, L_2, \dots, L_n 构建估计图像 G_1 , 具体思路是先将 L_1, L_2, \dots, L_n 根据线段的方向归类, 把其中方向接近、相距小于距离分辨率的直线段归为一类, 其中距离分辨率由下式计算^[10]:

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (14)$$

式中, c 是光速, τ 是激光脉冲宽度。但在实际情况下, LRTI 系统的探测电路带宽等也会对距离分辨率

产生影响。在探测电路带宽无法满足理想实验要求的情况下,激光脉冲会产生一定程度的展宽^[10],此情况下的距离分辨率需用以下公式进行计算:

$$\Delta R = \frac{c}{2} \sqrt{\sigma_{APD}^2 + \tau_p^2 + \sigma_{AD}^2}, \quad (15)$$

式中, τ_p 是激光脉冲宽度, σ_{AD} 是高速数据采集引起的时间误差, σ_{APD} 是 APD 探测器的时间响应误差, 综合考虑探测器响应时间、AD 数据采集模块时间误差等因素后, 可以计算得到 LRTI 系统的实际距离分辨率。其中, 方向接近、相距小于距离分辨率的直线段归类后, 对每类中的所有点进行分段线性拟合, 得到若干条互相相交的直线, 求出各直线的交点坐标, 然后将相距小于距离分辨率的交点坐标合并, 取其坐标平均值形成新的交点坐标作为封闭图形的顶点, 最后依次连接各坐标点形成首尾连接的直线段 L_1', L_2', \dots, L_m' , 构建得到的闭合图形即估计图像 G_1 。

对估计图像 G_1 做 Radon 变换得到 180 度下的投影数据, 根据式 (13) 将角度 ϕ 的投影数据 $p^*(s, \phi)$ 拆解为角度 ϕ 的回波投影数据 $p(s, \phi)$ 和角度 $\phi + \pi$ 的回波投影数据 $p(s, \phi + \pi)$, 也就是说, 拆解得到了 360 度下的回波投影数据。取回波投影数据 $p(s, \phi)$ 的第一个峰值点位置作为角度 ϕ 下回波数据的峰值位置, 通过校正各角度下回波投影峰值相对回波数据的偏差, 得到校正后的多角度激光回波数据, 然后再次重建目标图像。

2.4 算法流程

综上所述, 可总结基于目标轮廓自动校正的 LRTI 投影配准算法流程如图 4 所示。首先, 将角度 ϕ 与角度 $\phi + \pi$ 的回波数据叠加得到叠加后形成的投影数据, 利用 FBP 算法实现目标图像重构。接着, 根据 FBP 重构图像, 通过 LSD 算法给出直线的初始估计。然后, 把其中方向接近、相距小于距离分辨率的直线段归为一类, 对每类中的所有点进行分段线性拟合, 得到若干条互相相交的直线并据此构建出闭合图形即估计图像。最后, 根据最佳估计图像对各角度回波数据的峰值点相对回波投影数据峰值点位置进行校正, 得到校正后的多角度激光回波数据, 并再次重建得到配准后的重构图像 G_2 。

3 实验验证与结果分析

3.1 系统构成与实验验证

图 5 所示为 LRTI 系统示意图, 该系统包括发射、接收、数据采集和处理三个部分: 发射部分由皮

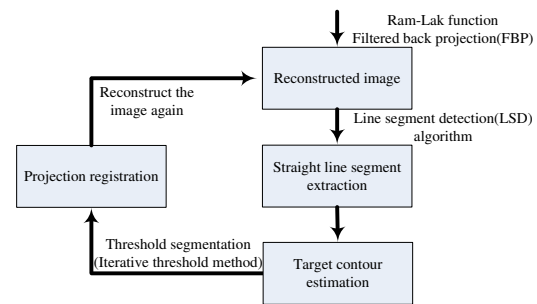


图 4 投影配准算法流程图

Fig. 4 The flow chart of projection registration algorithm

秒激光器、两个反射镜、一个消偏振分光棱镜、一个激光扩束镜构成; 接收部分采用 100 mm 口径的望远系统接收, 后接 62.5 μm 多模光纤输入到带宽为 7.5 GHz 的雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 光探测模块; 此外还有一个带宽为 15 GHz 的 PIN (Positive Intrinsic Negative) 光探测模块在消偏振分光棱镜另一侧用于记录参考信号; 数据采集和处理部分采用激光脉冲高速采集器完成数据采集, 并由工控机控制并完成实时数据处理。

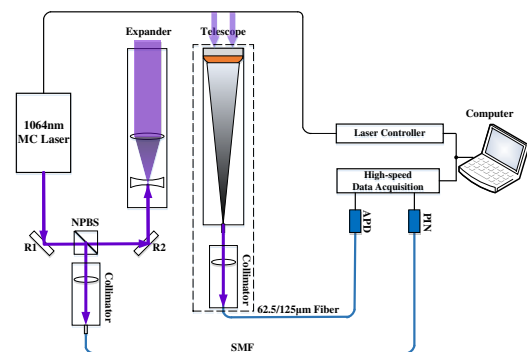


图 5 LRTI 系统示意图: R, 反射镜; NPBS, 消偏振分光棱镜; APD, 雪崩光电二极管; PIN, 光电二极管; SMF, 单模光纤; MC Laser, 微片激光器

Fig. 5 The schematic diagram of LRTI system: R, reflector; NPBS, Non-polarizing beam splitter; APD, avalanche photodiode; PIN, positive intrinsic negative; SMF, single mode fiber; MC Laser, microchip laser

系统发射部分采用的皮秒激光器工作波长为 1 064 nm, 脉冲宽度为 93 ps, 单脉冲能量为 10 μJ , 重复频率为 10 Hz, 激光扩束镜倍率为 15 倍。出射的脉冲激光经第一面反射镜后, 一路光经由消偏振分光棱镜进入 PIN 光探测模块, 由激光脉冲高速采集器通道一完成采集; 另一路光通过消偏振分光棱镜后, 经由第二面反射镜入射扩束镜, 然后照射到目标处。受目标表面调制得到的回波波形被望远

系统接收,然后耦合进多模光纤并输入 APD 光探测模块,由激光脉冲高速采集器通道二完成采集;通道一采集的出射信号作为参考信号,上升沿触发后延时 $6.546 \mu\text{s}$ 开始采集通道二的信号。

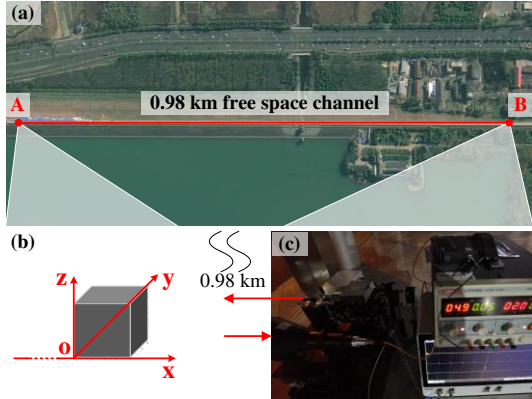


图6 0.98 km 实验验证示意图:(a) 实验场景示意图,(b) 目标模型示意图,(c) 系统实物图

Fig. 6 The schematic diagram of 0.98 km experiment verification: (a) the schematic diagram of experimental scene, (b) the schematic diagram of target model, (c) real system show

利用上述实验系统在合肥董铺水库开展了距离 0.98 km 的远距离 LRTI 实验,实验场景示意图如图 6(a)所示。构建边长为 8 cm 的立方体目标模型,如图 6(b)所示,LRTI 系统实物图如图 5(c)所示。图 5(a)中地点 A ($31^{\circ}53'14''\text{N}$, $117^{\circ}12'22''\text{E}$) 放置目标模型,地点 B ($31^{\circ}52'42''\text{N}$, $117^{\circ}12'22''\text{E}$) 放置 LRTI 系统。激光光斑在 0.98 km 处直径约为 22 cm,望远系统在 0.98 km 处视场约为 30 cm,激光光斑能够完全覆盖目标且望远系统视场大于目标。

3.2 实验结果与分析

采集得到立方体目标采样角度 360° 、采样间隔 1° 的回波数据 360 组,如图 7(a)所示。图中横轴代表角度、纵轴代表距离,不同距离处的回波强度在图像中用颜色标示,其中接近黄色代表信号较强,接近蓝色代表信号较弱,考虑到回波信号值不小于零的特性,所有回波信号都进行了负值归零的预处理。利用分光法确定旋转中心距离 d ,并在图 7(a)中标示,按照 2.2 节所述的方法将 181° 到 360° 的回波数据以旋转中心为对称轴作对称变换,然后与 1° 到 180° 的回波数据叠加,得到叠加后形成的投影数据如图 7(b)所示,然后使用 FBP 算法得到重构图像。

图 7(b)所示的 180° 的投影数据使用 FBP 算法重构得到目标重构图像 G_0 ,如图 8(a)所示。使用本

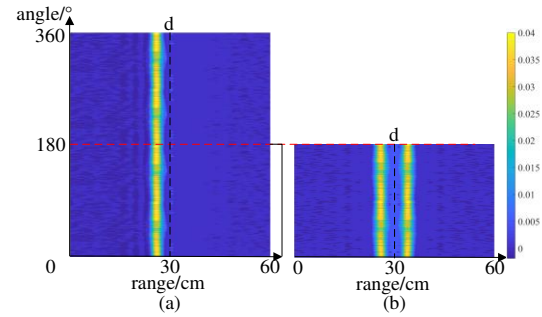


图7 叠加前后的投影数据:(a) 多角度回波数据,(b) 叠加后形成的投影数据

Fig. 7 Projection data before and after superposition: (a) multi-angle echoes data, (b) projection data formed after superposition

文算法对图 7(b)所示的多角度激光回波数据进行校正,并重新叠加形成新的投影数据,并再次重建得到配准后的重构图像 G_2 ,如图 8(b)所示。

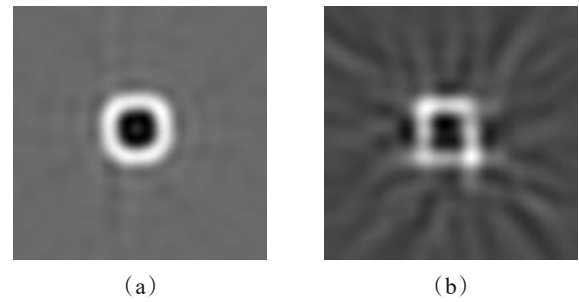


图8 配准前后的目标重构图像:(a) 配准前的重构图像,(b) 配准后的重构图像

Fig. 8 Reconstructed images of the target before and after registration: (a) reconstructed image before registration, (b) reconstructed image after registration

为验证本文算法的有效性,应将配准前后的重构图像与理想重构图像进行比较。考虑到灰度图像存在大量伪影和噪声,因此需要对其进行分割,LRTI 图像的目标提取与分割已经得到了广泛的研究,最常用分割算法是迭代阈值法。该算法基于逼近思想,优点是计算量不大,在一定条件下受图像灰度的变化影响不大,在其他实时图像处理系统中也得到了广泛的应用^[16]。具体流程是先得到图像的最大灰度值 T_{\max} 和最小灰度值 T_{\min} ,然后取均值作为初始阈值:

$$T_0 = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}, \quad (16)$$

根据初始阈值 T_0 将图像分割为两部分,两部分

的平均灰度值 Z_0 和 Z_1 由下式计算得到:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{255} w(i) \times i}{n}, \quad (17)$$

式中 n 是像素的总数, i 是灰度值, $w(i)$ 是灰度值 i 的权值。新的阈值由下式计算得到:

$$T_1 = \frac{Z_0 + Z_1}{2}. \quad (18)$$

将 T_1 赋值给 T_0 , 然后根据赋值后的 T_0 对图像进行重新分割, 重新计算两部分的平均灰度值, 重复该过程直到 $T_1 = T_0$ 时结束, 此时的分割结果即为可用于与理想重构图像比较的阈值分割图像。使用迭代阈值法得到配准前重构图像的阈值分割图像, 如图 9(a) 所示, 配准后重构图像的阈值分割图像, 如图 9(b) 所示。

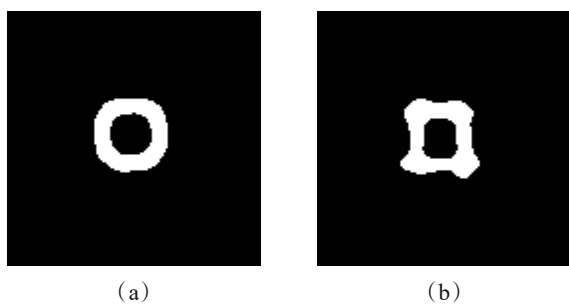


图9 配准前后重构图像的阈值分割图像:(a)配准前重构图像的阈值分割图像,(b)配准后重构图像的阈值分割图像

Fig. 9 Threshold segmentation of reconstructed images before and after registration: (a) threshold segmentation of reconstructed image before registration, (b) threshold segmentation of reconstructed image after registration

为了客观比较配准前后重构图像的重建图像质量, 我们结合目标表面形状代入激光器脉冲宽度、探测电路带宽等主要参数, 得到理想的目标重构图像, 并引入以下图像质量评价指标^[17]:

(1) FNR (False Negative Rate): 漏警率, 提取的假像素数与真实像素数的比值, 其中假像素称为负样本, 真实像素称为正样本, 公式如下:

$$FNR = \frac{FN}{TP + FN} = \frac{FN}{P}, \quad (19)$$

式中, FN 为将正样本提取为负样本的个数, TP 为将正样本提取为正样本的个数, P 为正样本的总个数。该值的最优值为 0, 即提取所有像素点。

(2) FPR (False Positive Rate): 虚警率, 提取的假

像素数与提取的总像素数的比值, 公式如下:

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} = \frac{FP}{N}, \quad (20)$$

式中, FP 为将负样本提取为正样本的个数, TN 为将负样本提取为负样本的个数, N 为总样本数。该值的最优值为 0, 表示提取的像素是正确的。

(3) QF (Quality Factor): 品质因数, 图像分割质量的综合评价, 综合了虚警率和漏警率, 公式如下:

$$QF = \frac{TP}{P + FP}, \quad (21)$$

该值的最佳值为 1, 即不仅提取了所有的像素, 而且提取了正确的像素。分别计算配准前的目标重构图像 G_0 和配准后的目标重构图像 G_2 的 FNR、FPR、QF 值, 如表 2 所示。

表2 配准前后重构图像比较

Table 2 Comparison of reconstructed images before and after registration

	FNR	FPR	QF
G_0	0.255 4	0.140 5	0.663 8
G_2	0.183 2	0.159 6	0.707 1

由上表结果易得, 配准后的目标重构图像 G_2 相较于配准前的目标重构图像 G_0 , 主要降低了重构图像的漏警率。综合来看, 配准后的目标重构图像其品质因数提高 6% 以上, 有效减少了激光脉冲发射和探测器接收的随机抖动等造成的干扰, 解决了图像模糊的问题。实际上, 本文使用了迭代阈值法对图像进行阈值分割, 并没有完全消除目标轮廓中的伪影, 特别是配准后的目标重构图像, 如果对图像分割方法进行改进, 配准后的目标重构图像其品质因数还将进一步提高。

4 总结

本文针对某些剖面形状较为简单的体目标, 如立方体、三棱柱等, 提出了基于目标轮廓自动校正的投影配准方法。该方法利用了这类目标重构图像轮廓为闭合图形的特点, 采用重建目标的轮廓进行自配准, 解决了 LRTI 多角度回波数据需要相对于旋转中心对齐的问题。实验结果表明, 使用本文算法配准后的目标重构图像, 其品质因数提高 6% 以上, 有效减少了激光脉冲发射和探测器接收的随机抖动等造成的干扰, 解决了图像模糊的问题。从时间成本来看, 本文算法在 RAM 为 8 GB (Kingston DDR4 2133 MHz), CPU 基频为 4.20 GHz (Intel Core

i7-7700K)的硬件环境下,处理大小128×128像素的图像时总耗时为3.427 s,而LRTI实现超分辨率成像的理论基础是以时间换空间,整个探测过程的时间成本远高于算法本身。因此,从处理时间来看,算法速度相对采集过程来说已经足够保证实时处理,应该更多地关注算法的配准效果而非时间成本。此外,由于本文开展的实验距离为0.98 km,这种距离上大气湍流干扰影响较小,多角度激光回波数据在时间维度上的漂移本身也比较小。因此,使用本文算法配准后得到的重构图像其品质因数提升较小,后续还将优化系统并开展10 km以上的远距离LRTI实验,进一步验证本文算法的有效性。综上所述,本文提出的基于目标轮廓自动校正的投影配准方法易于实现对简单目标旋转中心的自配准,能有效减少激光脉冲发射和探测器接收的随机抖动等造成的干扰,解决了图像模糊的问题,是一种特殊形状目标的快速配准方法,可以作为LRTI多角度回波配准的新思路。

References

- [1] Hu Yi-Hua, Zhang Xin-Yuan, Xu Shi-Long, *et al.* Research progress of laser reflective tomography techniques [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, **48**(4): 0401002. (胡以华, 张鑫源, 徐世龙, 等. 激光反射层析成像技术研究进展[J]. *中国激光*, 2021, **48**(4): 0401002.
- [2] Parker J K, Craig E B, Klick D I, *et al.* Reflective tomography: images from range-resolved laser radar measurements [J]. *Applied Optics*, 1988, **23**(13): 2642-2643.
- [3] Knight F K, Klick D, Ryan-Howard D P, *et al.* Laser radar reflective tomography utilizing a streak camera for precise range resolution [J]. *Applied Optics*, 1989, **28**(12): 2196-2198.
- [4] Matson C L, Magee E P, Holland D E. Reflective tomography using a short-pulse length laser: system analysis for artificial satellite imaging [J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**: 2811-2820.
- [5] Matson C L, Boger J K, Miceli W J. Laboratory validation of heterodyne laser radar intensity projection signal-to-noise expressions [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**: 3165 - 3173.
- [6] Matson C L. Short pulse length heterodyne laser radar reflective tomography: projection generation and signal-to-noise ratios [J]. *Optics Communications*, 1997, **137**(4-6): 343-358.
- [7] Matson C L, Mosley D E. Reflective tomography reconstruction of satellite features—field results [J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(14): 2290-2296.
- [8] Fetzer G, Murray J T, Plath J, *et al.* Tomographic lidar [C]. in *Lasers, Sources and Related Photonic Devices*, OSA Technical Digest Series (CD) (Optica Publishing Group), 2010, LSWA1-LSWA3.
- [9] Zhang Xin-Yuan, Hu Yi-Hua, Shen Shi-Yang, *et al.* Kilometer-level laser reflective tomography experiment and debris barycenter estimation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, **71**(11): 205-214. (张鑫源, 胡以华, 谌诗洋, 等. 公里级激光反射层析实验和碎片质心估计[J]. *物理学报*, 2022, **71**(11): 205-214.
- [10] Zhang Xin-Yuan, Hu Yi-Hua, Wang Yi-Cheng, *et al.* Determining the limiting conditions of sampling Interval and sampling angle for laser reflective tomography imaging in sensing targets with typical shapes [J]. *Optics Communications*, 2022, **519**: 128413.
- [11] Jin Xiao-Feng, Sun Jian-Feng, Yan Yi, *et al.* Feature tracking for projection registration in laboratory-scale reflective tomography laser radar imaging [J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(18): 3475-3480.
- [12] Zhang Xin-Yuan, Hu Yi-Hua, Xu Shi-Long, *et al.* Application of Image Fusion Algorithm Combined with Visual Saliency in Target Extraction of Reflective Tomography Lidar Image [J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 8247344.
- [13] Chen Jian-Biao, Sun Hua-Yan. Research on projection alignment method in laser reflection tomography [J]. *Optics Communications*, 2020, **455**: 124548.
- [14] Yan Bin, Li Lei. CT Image Reconstruction Algorithm [M]. Science Press, 2014. (闫宾, 李磊. *CT图像重建算法* [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [15] Rafael G, Jérémie J, Jean-Michel M, *et al.* LSD: a Line Segment Detector [J]. *Image Processing On Line*, 2012, **2**: 35 - 55.
- [16] Drever L, Roa W, McEwan W, *et al.* Iterative threshold segmentation for PET target volume delineation [J]. *Medical Physics*, 2007, **34**(4): 1253-1265.
- [17] Fawcett T. An Introduction to ROC Analysis [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, **27**(8): 861-874.